干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

2001—2020年三江源地区积雪日数变化及地形分异

曹晓云[1,2]，肖建设[1,2]，郝晓华[3]，史飞飞[1,2,4]，刘致远[1,2]，李素雲[1,2]
(1. 青海省防灾减灾重点实验室，青海 西宁 810001；2. 青海省气象科学研究所，青海 西宁 810001；3. 中国科学院西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730099；4. 青海师范大学地理科学学院，青海 西宁 810001)

摘　要： 基于积雪面积逐日无云遥感产品和气象观测资料，分析了2001—2020年三江源地区积雪日数的水平、垂直分布特征及变化规律，并对积雪日数与气温和降水量进行了相关分析。结果表明：(1) 2001—2020年三江源地区积雪日数呈西高东低，高海拔山脉大于盆地平原的分布格局，高海拔山脉地区积雪日数均值普遍大于200 d，85.48%的区域积雪日数呈波动增加趋势，显著增加区域占比为16.59%，平均增加速率为0.98 $d\cdot a^{-1}$。(2) 积雪日数及其变化趋势存在明显的海拔和坡向分异，积雪日数随海拔上升呈指数型增加，较低海拔(<3.0 km)区域积雪日数少、呈减少趋势且减少速率随海拔高度上升而加快；高海拔区域积雪日数较多且呈增多趋势，但海拔大于4.4 km后积雪日数增多速率随海拔上升而减缓，且5.5~6.0 km地区积雪日数呈减少趋势，高海拔地区积雪日数存在一定程度的“海拔依赖性”。积雪日数北坡大于南坡、西坡大于东坡，西北坡积雪日数最多，为78.30 d，不同坡向的积雪日数均呈增多趋势，其中西坡的增多速率最快，达1.04 $d\cdot a^{-1}$。(3) 近20 a三江源地区明显的“暖湿化”气候特征是影响积雪日数变化的主要原因，其中降水量是主要驱动因素，积雪日数增多与降水量增加密切相关，且高海拔地区积雪日数对降水量的依赖性更强。

关 键 词： 三江源地区；积雪日数；气候变化；地形分异
文章编号：

积雪在控制能量循环、全球水循环、物质循环等方面扮演着重要角色，对区域和全球社会经济、生态环境、气候变化产生重要影响[1-4]。积雪日数可以直接影响积雪储量及现代冰川的发育和维持，进而调节周边及下游江河湖泊的径流量，同时，积雪日数也会改变区域地-气系统的能量交换过程，对辐射和能量平衡也有深刻的影响[5-7]，因此是地球系统研究中重要的变量之一。准确掌握积雪日数的时空变化特征对全球和区域气候预测、水文模拟、水资源管理等具有重要科学意义。

三江源地区平均海拔4000 m以上，是青藏高原的重要组成部分，由于高寒生物资源丰富、生态环境脆弱、气候变化敏感[8]，在国家生态安全方面具有战略地位[9]。全球气候变化问题在三江源地区尤为突出[10]，研究表明，三江源地区在过去60 a平均增暖速率为0.37 ℃·$(10a)^{-1}$，是全球平均水平[0.16 ℃·$(10a)^{-1}$]的2倍以上，且大幅高于同纬度[0.19 ℃·$(10a)^{-1}$]及中国区域[0.28 ℃·$(10a)^{-1}$][8]。21世纪以来，三江源地区降水量显著增加，各子源区降水显现增强信号[11-13]。这一背景下，气候变化对积雪的影响引起了国内外学者的广泛关注，通过野外调查、气象台站观测、遥感监测与模式模拟等方式取得了大量有价值的研究成果[2,6,14-19]。研究发现，以20世纪90年代为转折期，青藏高原积雪日数年际变化呈先增加后减少的趋势，存在较大空间异质性，气温和降水量是影响积雪日数的主要气候因子。但是，现有研究一方面主要关注青藏高原整体的积雪时空变化，缺乏对三江源地区等重点生态功能区

收稿日期： 2021-12-14；　**修订日期：** 2022-02-07
基金项目： 青海省防灾减灾重点实验室开放基金项目(QFZ-2021-Z01)；国家自然科学基金项目(41761078，41861049)；风云卫星应用先行计划项目(FY-APP-2021.0409)；青海省科技计划项目(2020-ZJ-731)；科技部国家科技基础资源调查专项(2017FY100501)资助
作者简介： 曹晓云(1993-)，女，硕士，工程师，主要从事青藏高原气候与环境研究. E-mail: xiaoyun_cao@126.com
通讯作者： 肖建设(1979-)，男，学士，正研级高工，主要从事青藏高原积雪遥感监测研究. E-mail: xiaojianshe@126.com

的探讨；另一方面，多侧重于积雪时空演变格局和驱动因素，关于积雪日数与地形因子，特别是与海拔、坡向之间的研究尚且缺乏。高原复杂的地形必然会导致积雪日数分布格局和变化特征存在较大的差异，而且青藏高原地区气候变暖存在“海拔依赖现象”[20-21]，尤其在3000~5000 m之间存在海拔依赖型变暖，但青藏高原地区的积雪变化趋势是否也存在一定的海拔依赖性仍然不清楚。最新研究表明，随着全球变暖加剧，高海拔地区积雪深度显著下降，很大程度上存在一定的海拔依赖性[22]，在三江源地区是否也存在这一现象值得深入研究。

遥感技术以其多尺度、多时相、多谱段、多层次等特点为开展高海拔山区积雪研究提供了优质的数据源，NOAA-AVHRR、MODIS、TM、FY等系列卫星数据是目前常用的积雪遥感数据源，尤其是MODIS积雪面积产品得到了广泛应用[1,3,17,18,23-25]。光学遥感产品的优点是空间分辨率高，但受云影响无法识别云下积雪情况，是积雪实时监测的一大障碍，尤其在青藏高原地区，受地形和混合像元的影响精度较差[26-27]，因此急需一套高精度的青藏高原MODIS积雪范围产品。中国2001—2020年积雪面积500 m逐日无云产品数据集有效提高了山区积雪面积精度，同时利用隐马尔科夫算法、多源数据融合方法实现了产品的完全去云[28-29]，在地形较为复杂的三江源地区进行积雪日数研究具有很大的应用潜力。

因此，本文基于积雪面积逐日无云遥感产品和气象观测资料，从积雪日数时空分布及演变特征、积雪日数分布及变化的地形分异、积雪日数对气候变化的响应3个方面分析了2001—2020年三江源地区积雪日数对气候变化的响应及地形差异特征，以期为三江源地区冰雪水资源合理利用、生态安全屏障和高质量绿色发展的需求服务提供科学依据。

1　研究区概况

青海省三江源地区（31°39′~36°12′N，89°45′~102°23′E）位于青藏高原腹地，总面积约为30.25×10⁴ km²，平均海拔3500~4800 m。三江源地区地形复杂，地势总体呈西北高、东南低的态势，昆仑山脉、唐古拉山脉、巴颜喀拉山、可可西里山横贯其间，这些山脉海拔均5000 m以上，高大山脉的雪线以上分布有终年不化的积雪，雪山冰川广布，是中国冰川集中分布地之一[8]。长江、黄河、澜沧江、湄公河均发源于此，且沼泽湿地、湖泊水体密布，是中国乃至东亚江河的重要水源涵养区，被誉为“江河源”、“中华水塔”和“亚洲水塔”，冰雪融水是重要的补给方式。三江源地区是典型的高原大陆性气候，冷热两季交替、干湿两季分明、年温差小、日温差大、日照时间长、辐射强烈、四季区分小。区内主要以高寒草地及湿地、冰川和高山永久积雪为主，是重要的生态屏障和生态调节区（图1）。

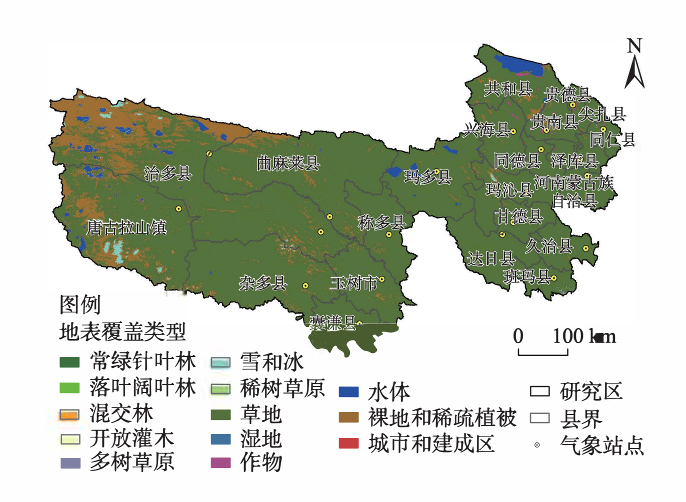


图1　三江源地区气象站点和地表覆盖类型分布

Fig. 1　Distributions of meteorological stations and land cover types in Sanjiangyuan area

2　数据与方法

2.1　数据来源与处理

2.1.1　中国2000—2020年积雪面积500 m逐日无云产品　中国2001—2020年积雪面积500 m逐日无云产品主要针对中国积雪特性，是基于MODIS反射率产品MOD/MYD09GA，利用Landsat TM数据作为真值，结合MODIS土地覆盖分类产品MCD12Q1，利用不同土地覆盖类型条件下发展的多指数结合积雪判别算法生成，有效提高了林区和山区积雪面积精度，同时利用隐马尔科夫算法、多源数据融合等方法实现了产品的完全去云。该数据集以HDF5文件格式存储，每个HDF5文件包含18个数据要素，其中包括数据值（0=陆地、1=积雪、2=雪水当量插补积雪、3=内陆水或海洋、4=冰川、255=填充值）、数据起始日期、经纬度等，从国家冰川冻土沙漠科学数据中心可免费获得（http://www.ncdc.ac.cn/portal/meta-

data/be3a4134-2e5c-467f-8a5e-b1c0ed6cc341),精度满足科学研究需求[29]。

2.1.2 数字高程模型(DEM)数据 DEM采用SRTM (Shuttle radar topography mission)数据,为V.003版本,来源于美国地质勘探局(USGS; https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003/),空间分辨率为90 m。本文利用DEM数据研究不同地形因子和积雪日数空间分布及变化特征之间的关系,为进行叠加分析,将其重采样和重投影成与积雪数据一样的空间分辨率和投影,并利用ArcGIS软件生成海拔和坡向分布图,将海拔从0~6.5 km按一定间隔划分为14级(图2a),将坡向按45°等间隔划分为8类(图2b)。

2.1.3 气象数据 选取2001年1月1日—2020年12月31日三江源地区周围134个气象站的逐日气温和降水数据,采用ANUSPLIN专用气候插值软件[30]的薄盘样条函数法实现气象数据空间插值,并以DEM数据为协变量提高插值准确性,获得空间分辨率为500 m×500 m的气象格点数据,最后裁出研究区范围。其中,三江源地区气象台站分布如图1所示,数据来源于中国气象局综合气象信息共享平台(CIMISS; http://10.181.89.55/cimissapiweb/),经过严格的质量控制,准确性及完整性满足科学研究需求。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析 采用最小二乘法[31]逐像元进行积雪日数年际变化趋势计算,计算公式为:

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} SCD_i - \sum_{i=1}^{n} i \times \sum_{i=1}^{n} SCD_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{1}$$

式中:θ_{slope}为变化斜率;i为1~20的年序号;SCD_i为第i年的积雪日数。当$\theta_{slope}>0$时,表示20 a来该像元的积雪日数呈增加趋势;当$\theta_{slope}<0$时,表示积雪日数呈减少趋势;θ_{slope}的绝对值越大,积雪日数的变化程度越大。最后采用F检验进行变化趋势的显著性检验。

2.2.2 偏相关分析 采用偏相关系数[31-32]分析积雪日数与气温和降水量之间的相关程度,研究气温(降水量)对积雪日数的影响且排除降水量(气温)的干扰。计算公式为:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz} R_{yz}}{\sqrt{\left(1 - R_{xy}^2\right)\left(1 - R_{yz}^2\right)}} \tag{2}$$

式中:$R_{xy,z}$表示气温不变时,积雪日数和降水量的偏相关系数,即在分析积雪日数和降水量的相关性中排除了气温的影响;R_{xy}、R_{xz}、R_{yz}分别表示积雪日数和降水量、积雪日数和气温、气温和降水量的相关系数,最后采用F检验法进行显著性检验。

3 结果与分析

3.1 积雪日数时空分布及演变

2001—2020年三江源地区积雪日数分布的区域差异明显,突出表现为西高东低、高海拔山脉地区大于盆地平原的特征。可可西里山、唐古拉山脉、阿尼玛卿山脉、巴颜喀拉山、格拉丹东冰川等是积雪日数高值区,积雪日数均值普遍大于200 d,部分地区甚至大于300 d,而环青海湖南部、共和盆地以及可可西里中部地区积雪日数不到100 d(图3a)。这是由于三江源中西部地区冬春季受西北冷

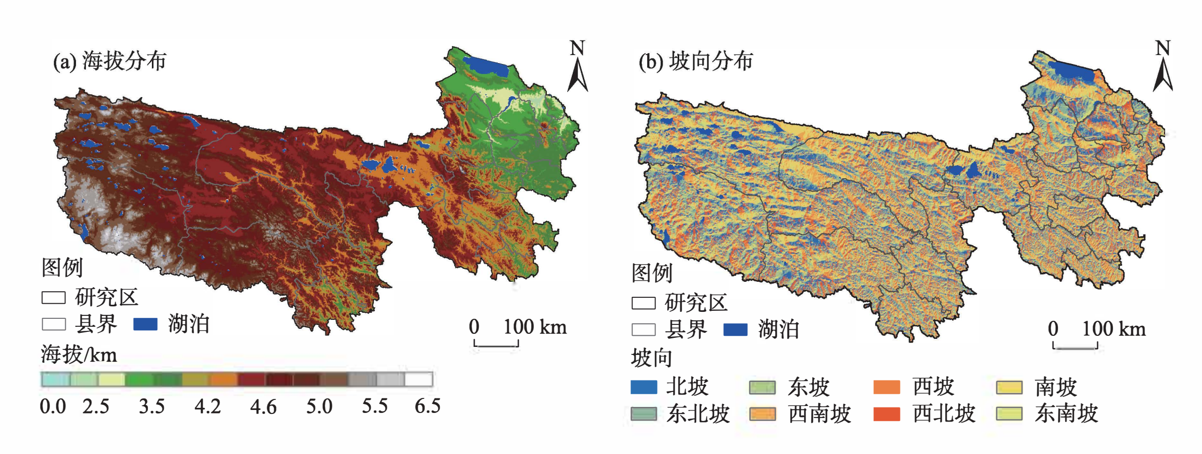


图2 三江源地区海拔与坡向分布

Fig. 2 Spatial distributions of elevation and slope in Sanjiangyuan area

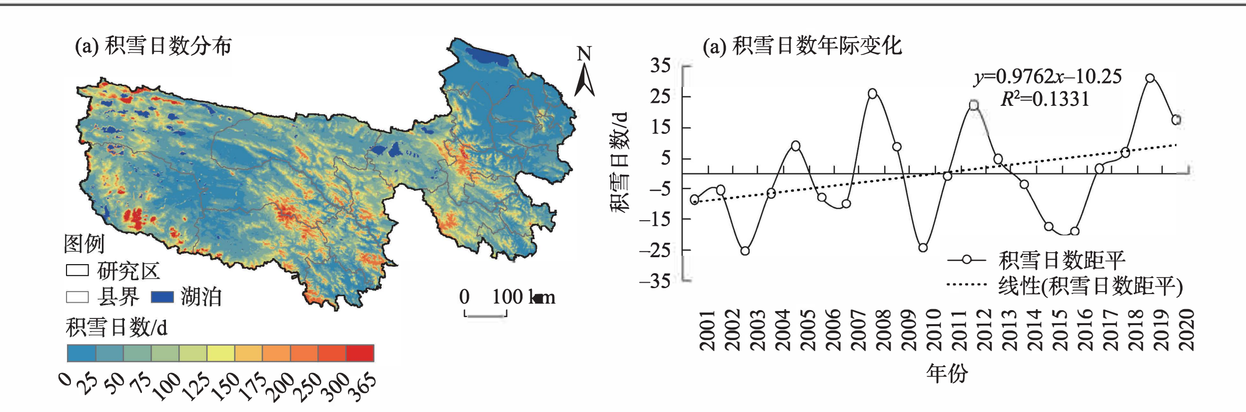


图3　2001—2020年三江源地区积雪日数分布与年际变化

Fig. 3　Spatial distribution and interannual variation of snow cover days in Sanjiangyuan area from 2001 to 2020

空气和西南印度洋和孟加拉湾暖湿气流的交汇，易形成有利于降雪的天气条件，同时高海拔引起的低温以及局地地形、环流影响有利于积雪的补给和保持，积雪日数较高[18,33]。而共和盆地和可可西里中部地区由于众多高山阻挡了水汽输送，季风影响减弱，同时海拔的高低也影响了气温以及降水量特征，这些因素共同导致积雪日数较低[19,25]。总体上，2001—2020年三江源地区积雪日数呈波动增加趋势，年际变化速率为0.98 d·a^{-1}(P<0.1)(图3b)。

三江源地区85.48%的区域积雪日数年际变化速率大于0，显著增多区域面积占比16.59%，表明近20 a来三江源地区积雪日数以增多趋势为主，黄河源玛多县积雪日数增多速率最快，平均增多速率为2.03 d·a^{-1}，其次是称多县、达日县、玉树市、曲麻莱县、玛沁县和久治县，平均积雪日数增多速率均超过1.00 d·a^{-1}。其中，玛多县中部、达日县中南部、曲麻莱县西北部、治多县东南部、玉树市北部、玛沁县北部和兴海县西南部等地区积雪日数增加趋势最为显著；而东北部的共和盆地、西部的唐古拉山镇、治多的中部及西北部、杂多的西南部地区积雪日数呈不显著减少趋势，格拉丹东冰川边缘地区以及部分高海拔山脉局部地区积雪日数呈显著减少趋势，显著减少区域占比为0.44%，减少速率达3.32 d·a^{-1}(图4)。研究表明，三江源自西南方向的水汽输送在过去近30 a增强[34-35]，尤其是21世纪以来降水量显著增加[11]，这可能是三江源中部地区积雪日数增多趋势显著的主要原因，而格拉丹东冰川边缘地区以及部分高海拔山脉局部地区积雪日数显著减少可能与气温升高具有较大的海拔依赖性以及降水量的空间格局差异性有关。

3.2　积雪日数地形分异

三江源地区积雪日数在不同海拔高度上具有较大的差异性。整体上，积雪日数随海拔上升呈指数型增加(R^2>0.92)，其中，海拔3.0~5.2 km地区为三江源地区积雪日数主要分布区，面积占比为93.67%，3 km以下地区积雪日数<10 d，3.0~5.2 km

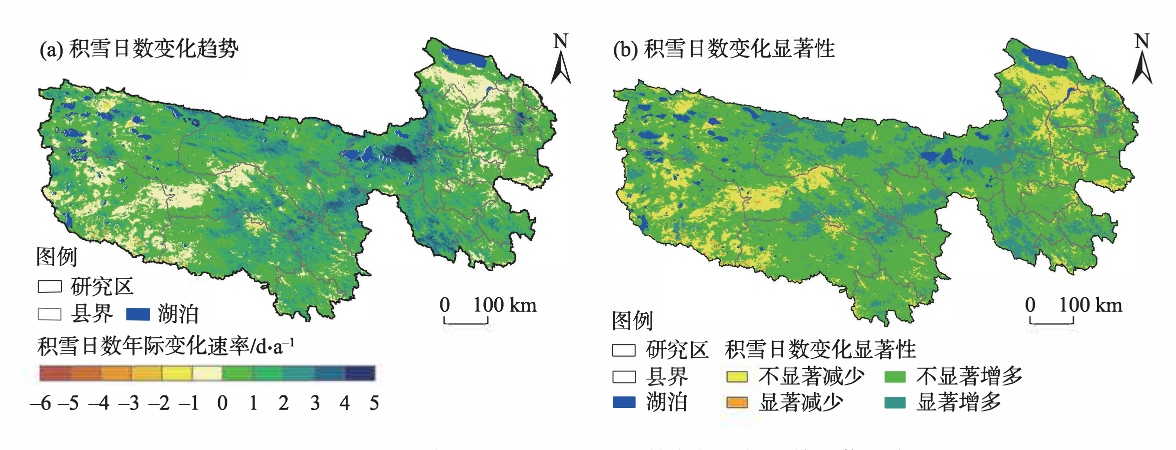


图4　2001—2020年三江源地区积雪日数变化趋势及其显著性检验

Fig. 4　Variation trend and significance test of snow cover days in Sanjiangyuan area from 2001 to 2020

地区积雪日数为11.71~107.27 d，呈阶梯式增多，5.2~5.5 km地区积雪日数为153.73 d，5.5~6.0 km地区积雪日数为284.74 d，6.0~6.5 km地区积雪日数最高，为328.01 d（图5）。分析认为，较低海拔（<3.0 km）区域气温较高，不利于积雪的保存，积雪日数相对较少；海拔3.0~5.5 km地区气温较低且受高大山脉的地形作用、大气环流影响多降水，这些分布特点有利于积雪累积；而海拔>5.5 km区域多雪山冰川，为永久或半永久积雪区，因此积雪日数最高。

从图6可以看出，2001—2020年三江源地区海拔<3.0 km的区域年平均积雪日数基本呈减少趋势，减少速率随海拔高度上升而加快；2.5~3.0 km地区

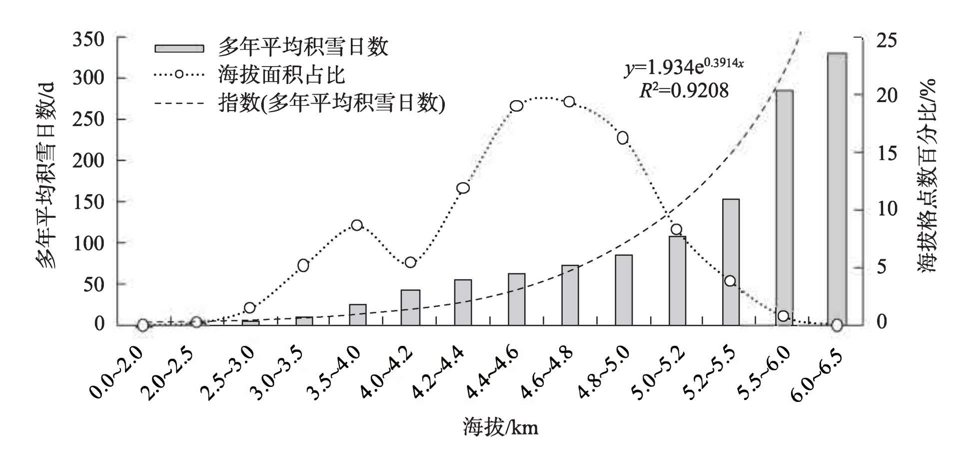


图5　三江源地区不同海拔高度多年平均积雪日数及占地面积变化

Fig. 5　Variations of average snow cover days and land area at different altitude ranges in Sanjiangyuan area

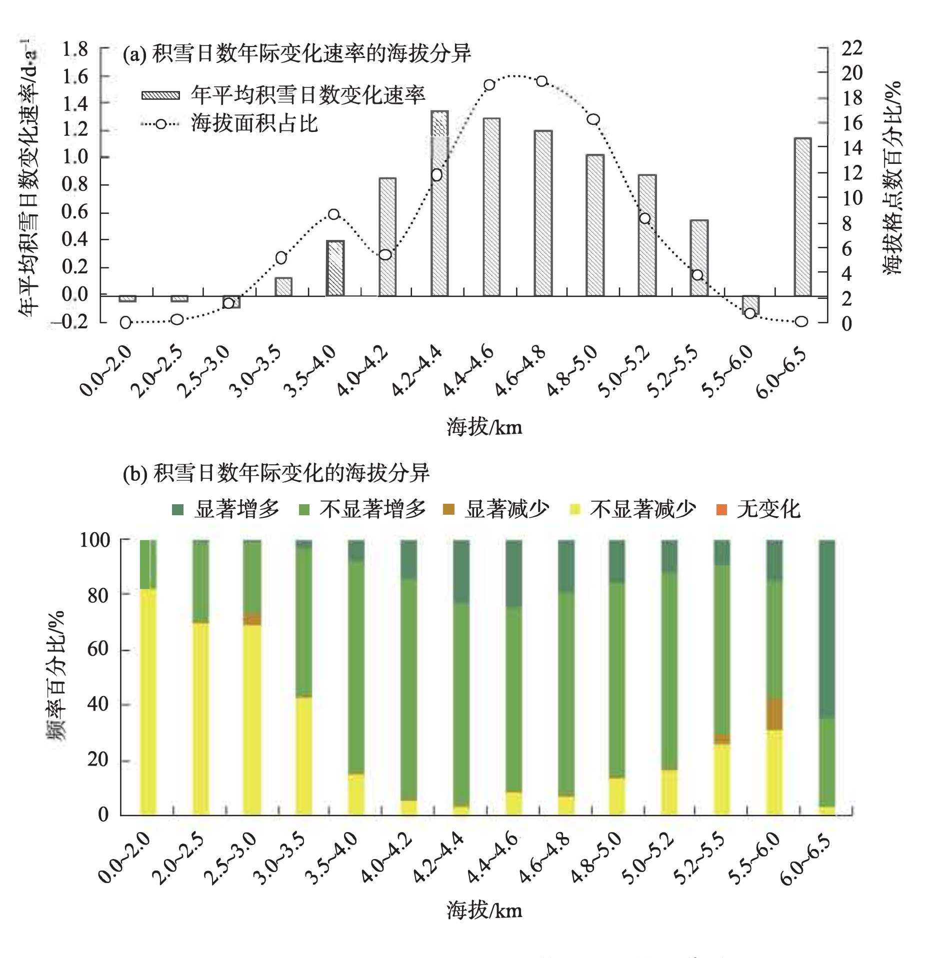


图6　三江源地区积雪日数变化趋势的海拔梯度分异

Fig. 6　Altitudinal gradient variation of snow cover days in Sanjiangyuan area

积雪日数减少速率较快，为0.09 d·a^{-1}，显著减少的区域面积占比为4.70%；3.0~5.5 km地区积雪日数均呈增多趋势，其中≤4.4 km的地区平均积雪日数增多速率随海拔上升而加快；4.2~4.4 km地区增多速率达1.34 d·a^{-1}，显著增多的区域面积占比为22.59%；>4.4 km的地区平均积雪日数增多速率随海拔上升而减缓；5.5~6.0 km地区平均积雪日数呈减少趋势，减少速率为0.13 d·a^{-1}，显著减少的区域面积占比为11.83%，表明高海拔地区积雪日数变化在一定程度上存在"海拔依赖性"；6.0~6.5 km地区平均积雪日数增多速率较快，为1.14 d·a^{-1}，显著增多的区域面积占比为63.97%；5.5~6.0 km地区多为冰川和雪山边缘地区，说明在整体水汽充沛的条件下，受升温影响冰川和雪山边缘地区仍有消融退缩趋势。

由三江源地区不同坡向的面积占比及积雪日数可以看出，三江源地区不同坡向的年平均积雪日数差异明显；虽然三江源地区以北坡、南坡、东北坡和西南坡为主，其面积占比分别为16.53%、16.17%、15.28%和13.01%(图7a)，但多年平均积雪日数呈现北坡大于南坡、西坡大于东坡的分布格局；其中，西北坡积雪日数最多，为78.30 d，其次是北坡、东北坡、西坡、东坡、东南坡、西南坡，年平均积雪日数分别为76.84 d、73.98 d、71.14 d、70.61 d、62.94 d、59.62 d，南坡的最少，为55.68 d(图7b)。分析认为，积雪分布主要受温度、地形地势和水汽输送的影响，而坡向主要通过影响太阳辐射和气流的地形抬升而影响积雪分布。虽然三江源地区主要受西北冷空气和西南印度洋、孟加拉湾暖湿气流的交汇，经地形抬升作用形成降雪，南坡是迎风坡，降雪较多，但相比于北坡，南坡为阳坡，可以吸收更多的太阳辐射，加之三江源地区辐射强烈，会导致积雪快速消融，不利于积雪的累积，这是南坡和北坡的主要区别，也使得南坡的平均积雪日数最低；东坡和西坡接收的太阳辐射基本相同，但是西南方向的暖湿气流会使得西坡的降雪大于东坡，这是西坡积雪日数大于东坡的主要原因[17]。

2001—2020年三江源地区不同坡向的积雪日数均呈增多趋势，其中西坡的增多速率最快，为1.04 d·a^{-1}，其次是西北坡、东北坡、东坡、北坡、西南坡和东南坡，积雪日数增多速率分别为1.02 d·a^{-1}、1.01 d·a^{-1}、0.10 d·a^{-1}、0.99 d·a^{-1}、0.95 d·a^{-1}和0.92 d·a^{-1}，南坡的增多速率最慢，为0.89 d·a^{-1}(图8a)。由不同坡向积雪日数的变化方向及程度分析可知，不同坡向积雪日数均以不显著增多为主，面积占比为68.25%~69.82%，显著增多区域面积占比为15.83%~17.07%，差异较小(图8b)。南坡受强烈的太阳辐射影响积雪消融较快，不利于积雪的积累，在西南方向的水汽输送增强的背景下积雪日数增多速率最慢，而相比于西北坡，西坡受西北冷空气的吹雪效应较小，因此积雪日数增多速率最快[17,34-35]。

3.3 积雪日数对气候变化的响应

2001—2020年三江源地区年平均气温为0.74~1.59 ℃，年降水量为383.04~608.07 mm；近20 a来，三江源地区气候表现出明显的"暖湿化"，其中平均气温以0.35 ℃·(10a)$^{-1}$(P<0.01)的速率极显著升温，年降水量以49.13 mm·(10a)$^{-1}$(P<0.05)的速率显著

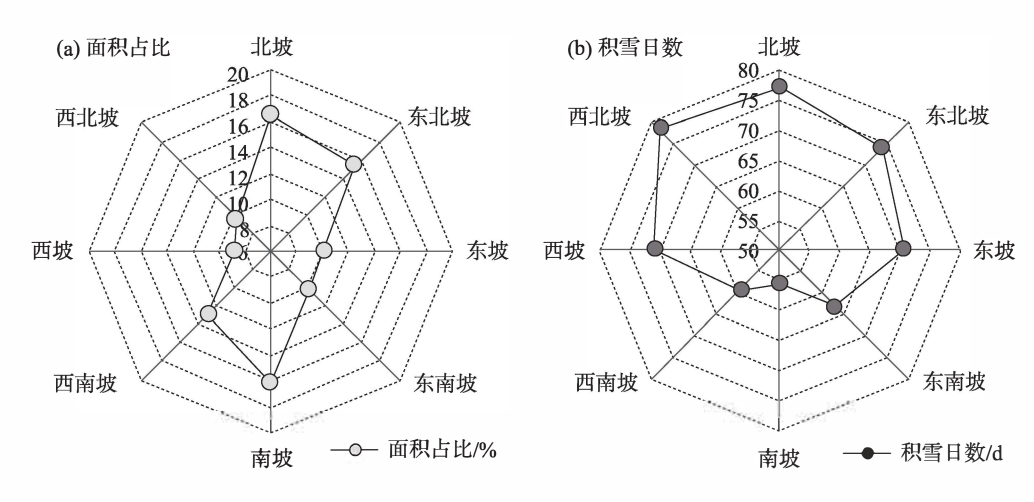


图7 三江源地区不同坡向的面积占比及积雪日数

Fig. 7 Area proportions and snow cover days of different slope directions in Sanjiangyuan area

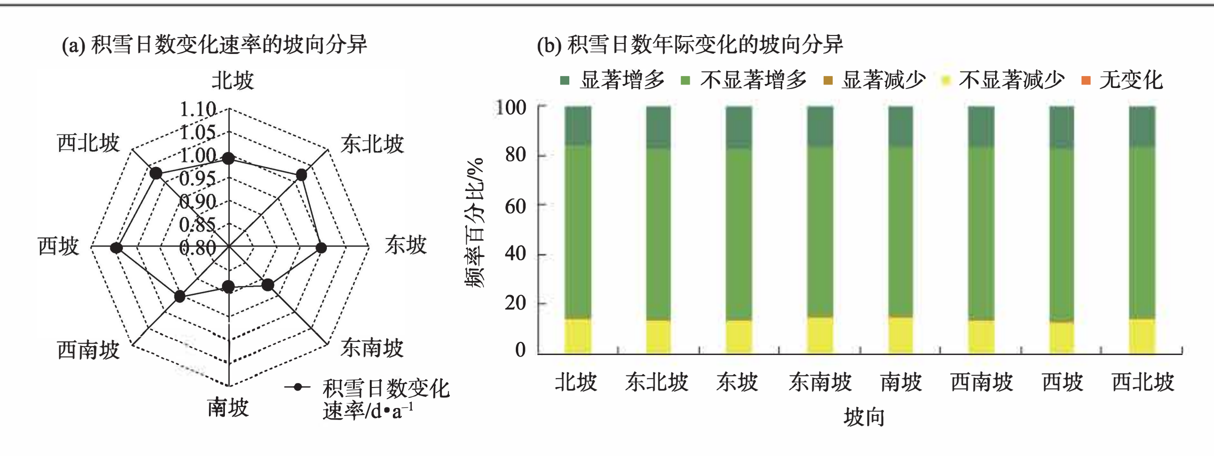


图8　三江源地区积雪日数变化趋势的坡向分异

Fig. 8　Slope variation of snow cover days in Sanjiangyuan area

增多，年际波动较大。对比年积雪日数可以发现，通常“冷湿”年份(如2008、2019年和2020年等)积雪日数偏多，“暖干”年份(如2010、2015年和2016年等)积雪日数偏少(图9)，表明三江源地区明显的“暖湿化”气候特征是影响积雪日数变化的主要原因之一。

进一步分析三江源地区积雪日数与同期气温、降水量的偏相关系数及显著性分布发现，三江源地区86.18%的区域积雪日数与气温呈负相关，其中36.38%呈显著负相关(P<0.1)，主要分布于三江源中部、东部地区，说明这些地区的气温对积雪日数的影响比较大，气温升高将导致积雪日数减少，而治多北部、唐古拉山镇、杂多西部、达日南部、久治和班玛的部分地区积雪日数与气温相关性较低(图10a~b)。降水方面，三江源地区95.71%的区域积雪日数与降水量呈正比，其中60.18%呈显著正相关(P<0.1)，主要分布在除治多北部、唐古拉山镇、杂多西部、囊谦南部、达日南部、久治和班玛以外的大部地区，表明这些地区降水量的增加是积雪日数增多的主要原因(图10c~d)。积雪日数与降水量的平均偏相关系数为0.42(P<0.05)，偏相关系数随海拔高度上升而线性增大；积雪日数与气温的平均偏相关系数为-0.28，偏相关系数随海拔高度上升而线性减小(图11)。这说明降水量是三江源地区积雪日数变化的主要驱动因素。近20 a来三江源地区积雪日数增多与降水量增多密切相关，且三江源地区积雪日数与气温和降水量的相关性存在“海拔依赖现象”，高海拔地区积雪日数对降水量的依赖性更强，低海拔地区对气温的依赖性更强。

4　结论

本文基于积雪面积逐日无云遥感产品和气象观测资料，分析了2001—2020年三江源地区积雪日数的水平、垂直分布特征和变化规律，并结合水热

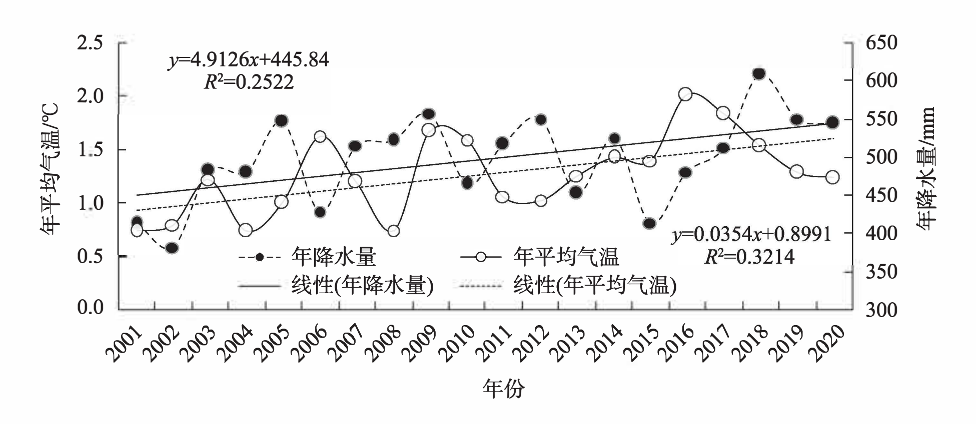


图9　2001—2020年三江源地区年平均气温、年降水量年际变化趋势

Fig. 9　Interannual variation trends of annual average temperature and annual precipitation in Sanjiangyuan area from 2001 to 2020

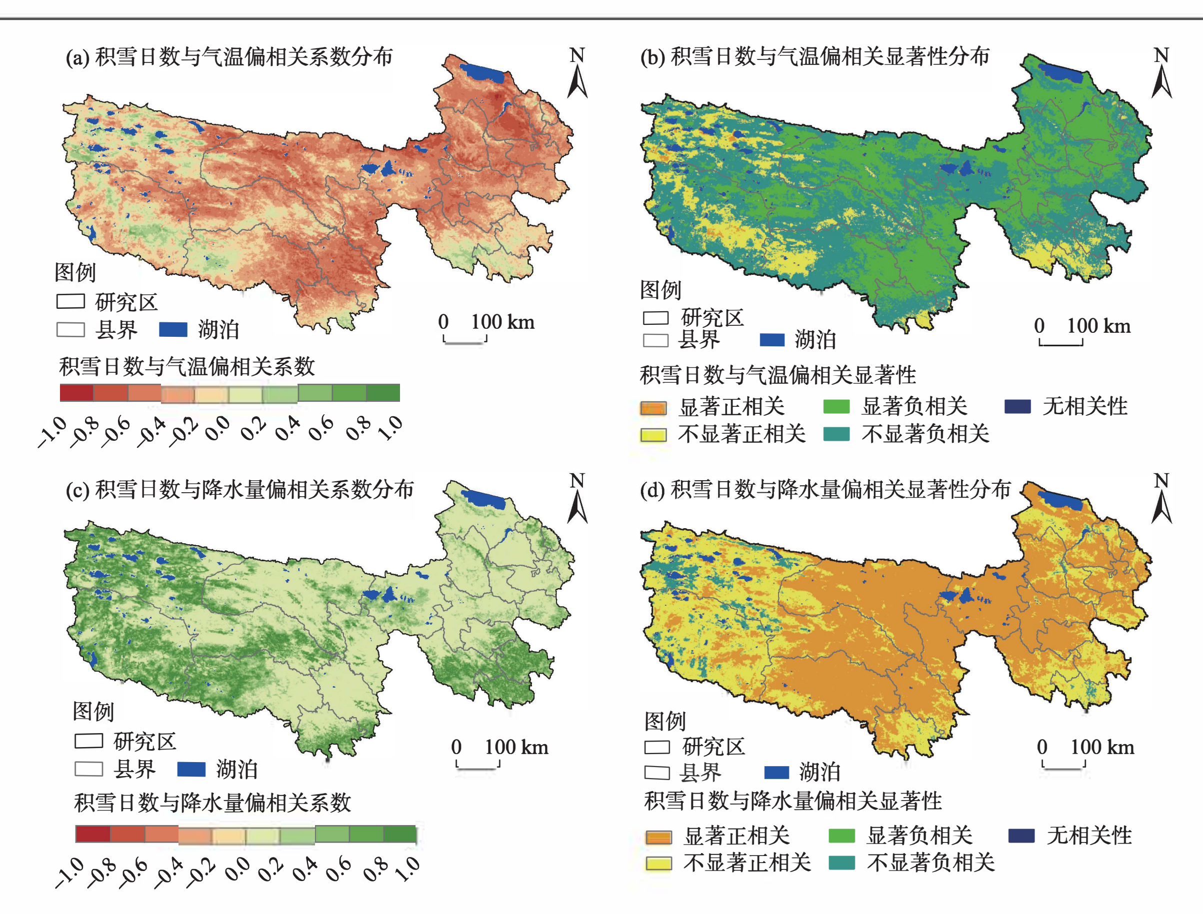


图10 2001—2020年三江源地区积雪日数与同期气温、降水量的偏相关系数及显著性分布

Fig. 10 Partial correlation coefficient and significant distributions of snow cover days with temperature and precipitation in the same period in Sanjiangyuan area from 2001 to 2020

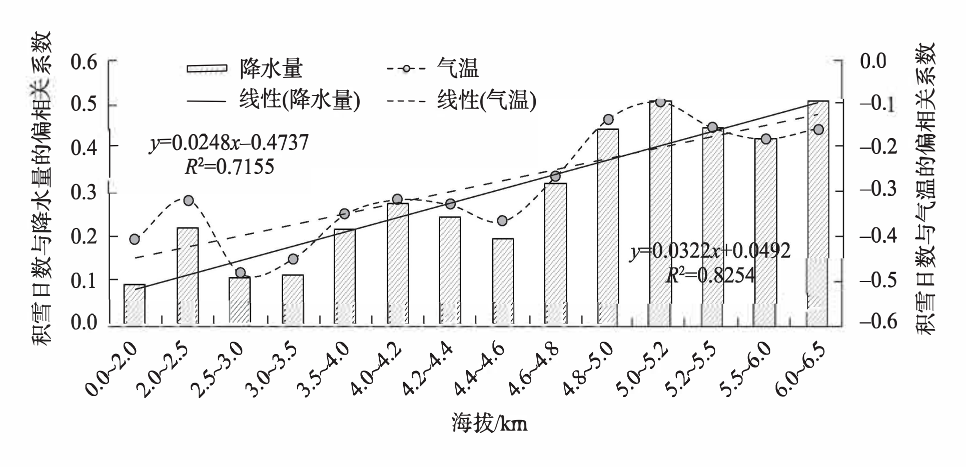


图11 2001—2020年三江源地区不同海拔高度积雪日数与降水量、气温偏相关系数的变化

Fig. 11 Variations of partial correlation coefficient of snow cover days with precipitation and temperature at different altitude ranges in Sanjiangyuan area from 2001 to 2020

因子进行了积雪日数与气温和降水量的相关分析，主要结论如下：

（1）2001—2020年三江源地区积雪日数呈西高东低、高海拔山脉大于盆地平原的分布格局。积雪日数高值区主要集中在可可西里山、唐古拉山脉、阿尼玛卿山脉、巴颜喀拉山、格拉丹东冰川等高海拔地区，积雪日数均值普遍大于200 d。85.48%的区域积雪日数呈波动增加趋势，显著增加区域面积占比为16.59%，平均增加速率为0.98 d·a^{-1}，其中玛多中部、达日中南部、曲麻莱西北部等三江源中部

地区积雪日数增加最为显著。

（2）2001—2020年三江源地区平均积雪日数及其变化趋势存在较明显的海拔和坡向分异。积雪日数整体上随海拔上升呈指数型增加，较低海拔（<3.0 km）区域积雪日数少，呈减少趋势且减少速率随海拔上升而加快；高海拔区域积雪日数较多且呈增多趋势，但大于4.4 km的地区平均积雪日数增多速率随海拔上升而减缓，且5.5~6.0 km地区积雪日数呈减少趋势，高海拔地区积雪日数存在一定程度的"海拔依赖性"，在整体水汽充沛的条件下，受升温影响冰川和雪山边缘地区仍有消融退缩趋势。积雪日数呈北坡大于南坡、西坡大于东坡的分布格局，其中西北坡积雪日数最多，为78.30 d，不同坡向的积雪日数均呈增多趋势，西坡的增多速率最快，为1.04 d·a^{-1}，其次是西北坡、东北坡、东坡、北坡、西南坡和东南坡。

（3）2001—2020年三江源地区气温以0.35 ℃·(10a)$^{-1}$的速率极显著升温，降水以49.13 mm·(10a)$^{-1}$的速率显著增多，明显的"暖湿化"气候特征是影响积雪日数变化的主要原因之一。降水量是三江源地区积雪日数变化的主要驱动因素，近20 a来三江源地区积雪日数增多与降水量增多密切相关，且三江源地区积雪日数与气温、降水量的相关性存在"海拔依赖现象"，高海拔地区积雪日数对降水量的依赖性更强。

参考文献（References）

[1] 张欢, 邱玉宝, 郑照军, 等. 基于MODIS的青藏高原季节性积雪去云方法可行性比较研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 714-724. [Zhang Huan, Qiu Yubao, Zheng Zhaojun, et al. Comparative study of the feasibility of cloud removal methods based on MODIS seasonal snow cover data over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 714-724.]

[2] 易颖, 刘时银, 朱钰, 等. 2002—2018年叶尔羌河流域积雪时空变化研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 15-26. [Yi Ying, Liu Shiyin, Zhu Yu, et al. Spatiotemporal variation of snow cover in the Yarkant River Basin during 2002—2018[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 15-26.]

[3] 拉巴卓玛, 邱玉宝, 次旦巴桑, 等. 西藏高原MODIS每日积雪产品去云算法过程对比验证研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 159-169. [Laba Zhuoma, Qiu Yubao, Cidan Basang et al. The validation of MODIS daily snow-cover products after cloud removal in Tibet Autonomous Region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 159-169.]

[4] 王建, 车涛, 李震, 等. 中国积雪特性及分布调查[J]. 地球科学进展, 2018, 33(1): 12-26. [Wang Jian, Che Tao, Li Zhen, et al. Investigation on snow characteristics and their distribution in China[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(1): 12-26.]

[5] 李茜, 魏凤英, 雷向杰. 1961—2016年秦岭山区冷季积雪日数变化特征及其影响因子[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 780-790. [Li Qian, Wei Fengying, Lei Xiangjie. The variation characteristics of snow days and its influencing factors in cold season in the Qinling Mountains from 1961 to 2016[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 780-790.]

[6] 陈鹏, 王勇, 张青, 等. 基于FY-3D/MERSI-II归一化积雪指数和MOD10A1的精度对比分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 434-439. [Chen Peng, Wang Yong, Zhang Qing, et al. Comparison of normalized snow cover indices between FY-3D/MERSI-II and MODIS[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 434-439.]

[7] 曹晓云. 基于MODIS的青藏高原地表反照率时空变化研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018: 12-30. [Cao Xiaoyun. Temporal and spatial variation of surface albedo over Qinghai Xizang Plateau based on MODIS[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Engineering, 2018: 12-30.]

[8] 靳铮, 游庆龙, 吴芳营, 等. 青藏高原三江源地区近60 a气候与极端气候变化特征分析[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1042-1055. [Jin Zheng, You Qinglong, Wu Fangying, et al. Changes of climate and climate extremes in the Three-Rivers Headwaters Region over the Tibetan Plateau during the past 60 years[J]. Journal of Atmospheric Science, 2020, 43(6): 1042-1055.]

[9] Yao T D, Thompson L, Yang W. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. Nature Climate Change, 2012, 2: 663-667.

[10] 傅敏宁. 青藏高原气候变化响应对我国防灾减灾的挑战[J]. 中国减灾, 2021, 4(7): 46-49. [Fu Minning. The response of climate change in the Qinghai Tibet Plateau to the challenge of disaster prevention and reduction in China[J]. Disaster Reduction in China, 2021, 4(7): 46-49.]

[11] 刘晓琼, 吴泽洲, 刘彦随, 等. 1960—2015年青海三江源地区降水时空特征[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1803-1820. [Liu Xiaoqiong, Wu Zezhou, Liu Yansui, et al. Spatial-temporal characteristics of precipitation from 1960 to 2015 in the Three Rivers' Headstream Region, Qinghai, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1803-1820.]

[12] Deng M S, Meng X H, Li Z G, et al. Responses of soil moisture to regional climate change over the Three Rivers Source Region on the Tibetan Plateau[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(4): 2403-2417.

[13] Li S S, Yao Z J, Wang R, et al. Dryness/wetness pattern over the Three-River Headwater Region: Variation characteristic, causes, and drought risks[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(7): 3550-3566.

[14] 车涛, 郝晓华, 戴礼云, 等. 青藏高原积雪变化及其影响[J]. 中国

科学院院刊, 2019, 34(11): 1247-1253. [Che Tao, Hao Xiaohua, Dai Liyun, et al. Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1247-1253.]

[15] Zhong X Y, Zhang T J, Zheng L, et al. Spatiotemporal variability of snow depth across the Eurasian continent from 1966 to 2012[J]. The Cryosphere, 2018, 12(1): 227-245.

[16] 白淑英, 吴奇, 史建桥, 等. 青藏高原积雪深度时空分布与地形的关系[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 171-178. [Bai Shuying, Wu Qi, Shi Jianqiao, et al. Relationship between the spatial and temporal distribution of snow depth and the terrain over the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2015, 27(4): 171-178.]

[17] 郭建平, 刘欢, 安林昌, 等. 2001—2012年青藏高原积雪覆盖率变化及地形影响[J]. 高原气象, 2016, 35(1): 24-33. [Guo Jianping, Liu Huan, An Linchang, et al. Study on variation of snow cover and its orographic impact over Qinghai-Xizang Plateau during 2001—2012[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(1): 24-33.]

[18] 除多, 达娃, 拉巴卓玛, 等. 基于MODIS数据的青藏高原积雪时空分布特征分析[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(2): 117-124. [Chu Duo, Da Wa, Laba Zhuoma, et al. An analysis of spatial-temporal distribution features of snow cover over the Tibetan Plateau based on MODIS data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2017, 29(2): 117-124.]

[19] 沈鎏澄, 吴涛, 游庆龙, 等. 青藏高原中东部积雪深度时空变化特征及其成因分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1150-1161. [Shen Liucheng, Wu Tao, You Qinglong, et al. Analysis of the characteristics of spatial and temporal variations of snow depth and their causes over the central and eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1150-1161.]

[20] You Q L, Chen D L, Wu F Y, et al. Elevation dependent warming over the Tibetan Plateau: Patterns, mechanisms and perspectives [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 210: 103349, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103349.

[21] Guo D L, Sun J Q, Yang K, et al. Revisiting recent elevation-dependent warming on the Tibetan Plateau using satellite-based data sets[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124 (15): 8511-8521.

[22] Guo D L, Pepin N, Yang K, et al. Local changes in snow depth dominate the evolving pattern of elevation-dependent warming on the Tibetan Plateau[J]. Science Bulletin, 2021, 66(11): 1146-1150.

[23] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 54(2): 127-140.

[24] 王宏伟, 黄春林, 郝晓华, 等. 北疆地区积雪时空变化的影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 508-516. [Wang Hongwei, Huang Chunlin, Hao Xiaohua, et al. Analyses of the spatiotemporal variations of snow cover in north Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 508-516.]

[25] 赵文宇, 刘海隆, 王辉, 等. 基于MODIS积雪产品的天山年积雪日数空间分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1510-1517. [Zhao Wenyu, Liu Hailong, Wang Hui, et al. A study of spatial distribution of snow days in the Tianshan Mountains based on MODIS snow products[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1510-1517.]

[26] Zhang H B, Zhang F, Zhang G Q, et al. Ground-based evaluation of MODIS snow cover product V6 across China: Implications for the selection of NDSI threshold[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651(Pt2): 2712-2726.

[27] 高扬, 郝晓华, 和栋材, 等. 基于不同土地覆盖类型NDSI阈值优化下的青藏高原积雪判别[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1162-1172. [Gao Yang, Hao Xiaohua, He Dongcai, et al. Snow cover mapping algorithm in the Tibetan Plateau based on NDSI threshold optimization of different land cover types[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1162-1172.]

[28] Zhao H Y, Hao X H, Wang J, et al. The spatial-spectral-environmental extraction endmember algorithm and application in the MODIS fractional snow cover retrieval[J]. Remote Sensing, 2020, 12(22): 3693, doi: 10. 3390/rs12223693.

[29] Hao X H, Huang G H, Zheng Z J, et al. Development and validation of a new MODIS snow-cover-extent product over China[J]. Hydrology and Earth System Sciences. [2021-11-22]. https://doi.org/10.5194/hess-2021-556.

[30] 刘志红, Li Lingtao, McVicar Tim R, 等. 专用气候数据空间插值软件ANUSPLIN及其应用[J]. 气象, 2008, 34(2): 92-100. [Liu Zhihong, Li Lingtao, McVicar Tim R, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLINN [J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(2): 92-100.]

[31] 黄嘉佑, 李庆祥. 气象数据统计分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 2015: 35-38. [Huang Jiayou, Li Qingxiang. Statistical analysis method of meteorological data[M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2015: 35-38.]

[32] 黄葵, 卢毅敏, 魏征, 等. 土地利用和气候变化对海河流域蒸散发时空变化的影响[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(12): 1888-1902. [Huang Kui, Lu Yimin, Wei Zheng, et al. Effects of land use and climate change on temporal and spatial changes of evapotranspiration in Haihe River Basin[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(12): 1888-1902.]

[33] 姜琪, 罗斯琼, 文小航, 等. 1961—2014年青藏高原积雪时空特征及其影响因子[J]. 高原气象, 2020, 39(1): 24-36. [Jiang Qi, Luo Siqiong, Wen Xiaohang, et al. Temporal and spatial characteristics and influencing factors of snow cover on the Qinghai Tibet Plateau from 1961 to 2014[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(1): 24-36.]

[34] Sun B, Wang H J. Interannual variation of the spring and summer precipitation over the Three River Source Region in China and the associated regimes[J]. Journal of Climate, 2018, 31(18): 7441-

7457.

[35] Sun B, Wang H J. Enhanced connections between summer precipitation over the Three-River-Source region of China and the global climate system[J]. Climate Dynamics, 2018, 52(5−6): 3471−3488.

Variation of snow cover days and topographic differentiation in Sanjiangyuan area from 2001 to 2020

CAO Xiaoyun[1,2], XIAO Jianshe[1,2], HAO Xiaohua[3], SHI Feifei[1,2,4], LIU Zhiyuan[1,2], LI Suyun[1,2]

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China; 2. Institute of Qinghai Meteorological Science Research, Xining 810001, Qinghai, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730099, Gansu, China; 4. School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract: In this work, based on daily cloudless remote sensing of snow cover and meteorological observation data, the horizontal and vertical distribution characteristics of and variations in snow cover days in the Sanjiangyuan (Three Rivers Headwaters) area of Qinghai, China from 2001 to 2020 are analyzed; the correlation between snow cover days and temperature and precipitation are also analyzed using the same data source. The results showed that: (1) From 2001 to 2020, the number of snow cover days in Sanjiangyuan area was higher in the west and lower in the east; the number of snow cover days is higher in the high-altitude mountain regions than in the basin plain. The average snow cover days in high-altitude mountains was generally greater than 200 d. The number of snow cover days in 85.48% of the areas showed an increasing tendency (with fluctuations), increasing by 16.59%, and the average rate of increase was 0.98 $d \cdot a^{-1}$. (2) There were clear differences in the number of snow cover days and their variation over the study period based on the altitude and aspectality of the study region. The number of snow cover days increases exponentially with increasing altitude: at low altitude (<3.0 km) the snow covered area was found to be small and shows a decreasing trend. At low altitudes the number of snow cover days rate of reduction accelerates with increasing altitude. At high- altitude areas the number of snow cover days is larger and shows an increasing tendency, but the increase rate in the number of snow cover days at heights of more than 4.4 km decreases as the altitude increases. In the elevation range 5.5−6.0 km, the number of snow covered days showed a tendency to decrease. The number of snow cover days onnorth-facing slopes is greater than that on south-facing slopes; west-facing slopes show a larger number of snow cover days than east-facing slopes. Northwest-facing slopes have the largest number of snow cover days with 78.30 d. The rate at which the number of snow covered days increases was found to be greatest for west-facing slopes (1.04 $d \cdot a^{-1}$). (3) The warm and humid climatic characteristics of the Sanjiangyuan area over the past 20 years were the main causes of the change in the number of snow cover days; precipitation was also a primary driving factor, and the increase of snow cover days was closely related to the increase in precipitation; snow cover days at high altitudes are more dependent on precipitation.

Key words: Sanjiangyuan area; snow cover days; climate change; topographic differentiation